

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级 \_\_\_\_\_

学 号: 200224013

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学  
硕 士 学 位 论 文

**AllnGaN/GaN PIN 紫外光电探测器的研究**

**Investigation of AllnGaN/GaN PIN Ultraviolet  
Photodiodes**

洪 灵 愿

指导教师姓名: 刘 宝 林 教授

专 业 名 称: 凝 聚 态 物 理

论文提交日期: 2005 年 8 月

论文答辩日期: 2005 年 8 月

学位授予日期: 2005 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2005 年 8 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

紫外光电探测器在航空、军事、民用等领域里具有非常重要的应用，本论文结合科研项目，进行了 PIN 结构紫外光电探测器的理论研究和实验制备。所做的研究工作如下：

- 1、目前，GaN 基紫外光电探测器一般采用 AlGaIn/GaN 材料来制备，但是 AlGaIn 与 GaN 之间晶格失配导致外延层位错密度较高，所以，我们提出用晶格常数和禁带宽度可以独立变化的 AlInGaIn 四元合金代替 AlGaIn 作为探测器的有源层。
- 2、用 MOCVD 系统生长了与 GaN 晶格基本匹配的 AlInGaIn 材料，通过 X 射线衍射分析该 AlInGaIn 材料有较高的晶体质量。结合 PL 谱的测量，从理论上算出了该 AlInGaIn 材料的组分为  $\text{Al}_{0.080}\text{In}_{0.018}\text{Ga}_{0.902}\text{N}$ 。
- 3、从理论上算出了  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  双层抗反射膜的最佳厚度分别为 154.8nm 和 121.0nm；对我们的 PIN 结构的器件进行了光谱响应的理论计算。
- 4、对器件的 p 电极进行了优化，形成了欧姆接触，最小比接触电阻为  $1.0 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}^2$ ；在此基础上，制作了 PIN 结构的探测器。
- 5、对该 PIN 结构的探测器进行了暗电流、I-V 特性、光谱响应等的测试。在 -5V 偏压下，暗电流为  $3.3 \times 10^{-11} \text{ A}$ ；I-V 特性显示正向开启电压为 1.5V 左右，反向击穿电压为 40V；在 -5V 偏压下，样品的最大响应

度为 0.163A/W @350nm, 量子效率为 58%。

本论文得到国家自然科学基金 60276029 和福建省自然科学基金 A0210006 的资助。

**关键词：**AlInGaN/GaN; PIN; 紫外光电探测器

厦门大学博硕士学位论文

# Abstract

Ultraviolet photodiodes have the important applications in many fields, such as, navigate, military, some civil industries, this paper analyzes and makes a PIN photodiode both in theory and experiment. Main works include:

1. In recent year, GaN-based ultraviolet photodiodes are usually made with AlGaN/GaN materials, but the mismatch between AlGaN and GaN leads to the high dislocation density in AlGaN. So, we try to use AlInGaN which can vary the bandgap and lattice constant independently as the source film of a photodiode.
2. Using MOCVD system, the AlInGaN material which has the same lattice constant with GaN is grown, the results of the X-ray diffraction (XRD) indicate that it has a good crystal quality. With the measure of the PL spectrum, we conclude the material is  $\text{Al}_{0.080}\text{In}_{0.018}\text{Ga}_{0.902}\text{N}$ .
3. Using theory analysis, the optimal thicknesses of  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  two layer films are determined to be 154.8 nm and 121.0 nm, respectively. Then, we do theoretic calculations of spectrum response for PIN ultraviolet photodiodes.
4. The p-type electrode is optimized to form the ohmic contact, the minimum specific ohmic contact resistant is  $1.0 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}^2$ . Then, the PIN ultraviolet photodiode is made with the optimized p-type electrode.

5. Dark-current, current-voltage characters and spectrum response of the PIN ultraviolet photodiode are measured. At -5V bias, the dark-current is  $3.3 \times 10^{-11}$  A. The current-voltage characters indicate that the turn on voltage is 1.5V and the breakdown voltage is 40V. At -5 bias, the maximum responsivity of device is 0.163A/W @350nm, and quantum efficiency is 58%.

This work is supported by National Natural Science Foundation under grant No.60276029 and Natural Science Foundation of Fujian province under grant No.A0210006.

**Keywords:** AlInGaN/GaN; PIN; ultraviolet photodiode

廈門大學博碩士論文

# 目录

第一章 引言 .....	1
1.1 紫外光电探测器的应用 .....	1
1.2 紫外光电探测器的材料种类 .....	1
1.3 GaN 基紫外光电探测器结构类型 .....	2
1.4 GaN 基 PIN 结构紫外探测器的性能及存在的困难 .....	4
参考文献 .....	6
第二章 AlInGaN 四元合金的结构特性和光学特性 .....	7
2.1 GaN 基材料性能综述 .....	7
2.2 AlInGaN 材料性能的理论计算 .....	9
2.3 样品的结构特性 .....	10
2.4 样品的光学特性 .....	13
2.5 本章小结 .....	15
参考文献 .....	16
第三章 基本原理和结构设计 .....	17
3.1 PN 光电二极管原理 .....	17
3.2 PIN 光电二极管原理 .....	17
3.3 探测器的性能参数 .....	19
3.4 结构设计 .....	23
3.4.1 抗反射膜的设计 .....	23
3.4.2 光谱响应 .....	27
3.4.2.1 光谱响应的理论计算 .....	29
3.4.2.2 光谱响应理论计算结果与讨论 .....	34
参考文献 .....	39

<b>第四章 AlInGaN/GaN 光电探测器的工艺</b> .....	<b>40</b>
<b>4.1 AlInGaN/GaN PIN 光电探测器的工艺流程</b> .....	<b>40</b>
4.1.1 流程框图 .....	40
4.1.2 工艺剖面图 .....	41
<b>4.2 探测器的 p 电极的工艺探究</b> .....	<b>46</b>
4.2.1 p 型欧姆接触的研究现状 .....	46
4.2.2 p 型欧姆接触的特征方法 .....	48
4.2.3 p 型欧姆接触的工艺优化 .....	49
<b>参考文献</b> .....	<b>53</b>
<b>第五章 器件性能测试与分析</b> .....	<b>56</b>
5.1 光电探测器暗电流测试 .....	56
5.2 光电探测器 I-V 特性测试 .....	57
5.3 光电探测器光谱响应测试 .....	59
<b>第六章 结 论</b> .....	<b>62</b>
<b>致 谢</b> .....	错误！未定义书签。

厦门大学博硕士论文



# CONTENTS

CHAPTER 1 INTRODUCTION .....	1
1.1 APPLICATION OF ULTRAVIOLET PHOTODIODES .....	1
1.2 MATERIALS FOR ULTRAVIOLET PHOTODIODES .....	1
1.3 STRUTURES FOR GaN BASED ULTRAVIOLET PHOTODIODES .....	2
1.4 PERFORMANCE AND DIFFICULTIES OF GaN BASED ULTRAVIOLET PHOTODIODES .....	4
REFERENCES .....	6
<b>CHAPTER 2 THE STRUCTURE AND PHOTO CHARACTERISTICS OF AlInGaN.....</b>	<b>7</b>
2.1 CHARATERISTICS OF GaN BASED MATERIALS .....	7
2.2 THEORETICAL CALCULATION OF AlInGaN .....	9
2.3 STRUCTURE CHARACTERISTICS OF AlInGaN .....	10
2.4 PHOTO CHARACTERISTICS OF AlInGaN .....	13
2.5 SUMMARY .....	15
REFERENCES .....	16
<b>CHAPTER 3 THE PRINCIPLES AND STRUCTURE DESIGN.....</b>	<b>17</b>
3.1 PRINCIPLES OF PN PHOTODIODES .....	17
3.2 PRINCIPLES OF PIN PHOTODIODES .....	17
3.3 PERFORMANCE OF PHOTODIODES .....	19
3.4 STRUCTURE DESIGN .....	23

3.4.1 DESIGN OF ANTI-REFLECTION FILM.....	23
3.4.2 SPECTRUM RESPONSE.....	27
3.4.2.1 THEORETIC CALCULATION OF SPECTRUM RESPONSE	29
3.4.2.2 RESULTS AND DISCUSSIONS.....	34
REFERENCES .....	39
<b>CHAPTER 4 EXPERIMENT TECHNIQUE OF AlInGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub></b>	
<b>ULTRAVIOLET PHOTODIODES .....</b>	<b>40</b>
4.1 EXPERIMENT FLOW OF AlInGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> ULTRAVIOLET PHOTODIODES	
.....	40
4.1.1 FLOW CHART.....	40
4.1.2 SECTION CHART.....	41
4.2 STUDY ON P-TYPE ELECTRODE TECHNIQUE .....	46
4.2.1 RESEARCHES ON P-TYPE OHMIC CONTACT.....	46
4.2.2 CHARACTERIZATION METHODS OF P-TYPE OHMIC CONTACT	
.....	48
4.2.3 OPTIMIZATION ON THE TECHNIQUE OF P-TYPE OHMIC	
CONTACT.....	49
REFERENCES .....	53
<b>CHAPTER 5 MEASURE AND ANALYSIS OF PHOTODIODES</b>	
<b>.....</b>	<b>56</b>
5.1 MEASURE OF DARK CURRENT .....	56
5.2 I-V CHARACTERS .....	57
5.3 SPECTRUM RESPONSE .....	59
<b>CHAPTER 6 CONCLUSIONS.....</b>	<b>62</b>

**ACKNOWLEDGMENTS .....**错误！未定义书签。

厦门大学博硕士学位论文

厦门大学博硕士学位论文

## 第一章 引言

### 1.1 紫外光电探测器的应用

在距地球表面 15km~20km 有一层臭氧层，臭氧对波长小于 300nm 的太阳辐射具有强烈的吸收。因此由于没有太阳的背景辐射，在臭氧层以下的地球大气层中，波长在 250nm~300nm 的辐射就很容易被探测到。工作在这个波段的探测器被称为“太阳盲”。由于其他波段的光探测器会受到太阳辐射的干扰（特别是在白天），这个波段的探测器具有非常重要的应用；在军用领域，可以对导弹发射进行探测。由于需要探测的距离很远，就要求有非常高的探测率，非常好的光谱选择性（最好能避开阳光的干扰）。并且可以制作成二维的探测器阵列用以成像。在民用领域，可以用于火焰的探测和监控。特别是在白天，要实现对火焰的观察与监控就需要探测器具有太阳盲的特性。在航空领域，深紫外探测（225nm~275nm）可用于飞行员的降落侍服系统。将紫外灯安装在跑道上，飞机上载有紫外摄像机，由于灯的波长远小于雨或雾的粒子，前向散射可使信号光传得很远。此外，用于 UV A(320nm~400nm)和 UV B(290nm~320nm)区域的放射计量测定器也是紫外探测应用的重要领域。

### 1.2 紫外光电探测器的材料种类

目前市场上的紫外探测器的材料及其性能价格见表 1.1<sup>[1]</sup>。

表 1.1 紫外探测材料和技术

	Si	GaP	SiC	II/VI	金 刚 石	AlGaIn	光 电 发 射 型
截 止 波 长(nm)	1100	525	300 — 400	350 — 450	225	200 — 365	120 — 900
探测率	中	中	中	中	中	中	高
紫 外 选 择 性	差	差	中	好	好	好	中
电压	低	低	低	低	低	低	高
可靠性	好	好	中	中	中	中	差
实用性	高	中	中	低	低	中	高
价 格 (\$)	<100		100-200		500	200	300

从上表可以看出, 只有 AlGaIn 材料制成的探测器和光电发射型探测器的截止波长包含 250nm~300nm 波段, 而光电发射型的可靠性差, 紫外选择性比 AlGaIn 差。通过改变组份, AlGaIn 的禁带宽度可从 3.4eV (GaIn) 调节到 6.2eV (AlN), 其截止波长可从 365nm (GaIn) 到 200nm (AlN)。同时 AlGaIn 具有硬度大, 熔点高, 可以在苛刻的物理和化学环境中工作, 光电转换量子效率高, 低表面复合率等优点。所以, AlGaIn 是用来制造“太阳盲”紫外光电探测器比较理想的材料。

### 1.3 GaN 基紫外光电探测器结构类型

许多研究小组开展了 GaN 基紫外光电探测器的研究, 表 1.2 所示为各

种结构的 GaN 基紫外探测器的性能。1991 年, Khan 小组研制成功第一支光电导效应 GaN 紫外探测器。1992 年, 研制出肖特基型紫外探测器。1997 年, 研制出的 GaN 基紫外探测器样管的零偏压响应为  $0.21\text{A/W(at } 356\text{nm)}$ , 内量子效率达 82%, 噪声等效功率(NEP)为  $6.6 \times 10^{-15}\text{W}$ 。2001 年, Peter Sandvik 等人研制出 PIN 结构的 AlGaIn 紫外探测器, 响应波长在 227~364nm 之间可调节, 外量子效率达 0.15。2002 年, APA 光学公司已经向市场推出商品化的 GaN 基 UV 探测器, 并借助于他们在 GaN 基 FET 器件领域的领先技术, 正在开发探测器/FET 混合器件, 以用于工作温度高达  $200 \sim 300^\circ\text{C}$  的火焰传感器<sup>[2~4]</sup>。通过比较了 GaN 光伏型和光电导型探测器, PIN 和 MSM 结构的 GaN 基探测器的响应度、带宽、信噪比等指标适于用于通信和成像要求。

表 1.2 AlGaIn/GaN 紫外探测器性能比较<sup>[4~6]</sup>

器件	光电导	PIN 型	肖特基型	MSM	APD
合金组分	0~0.35	0.7	0.35	0.25	0
器件尺寸	All	$60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$	$\phi=240\mu\text{m}$	$50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$	$\phi=30\mu\text{m}$
偏压 $V_b$	All	-5V	0V	5V	-80V
响应时间	s	30ns	14ns	350ps	<5 $\mu\text{s}$
响应度	$10^3\text{A/W}$	50mA/W	50mA/W	20mA/W	3A/W
归一化 D / $\text{cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$	$10^8$	$10^{11}$	$10^9$	$10^{10}$	
紫外/可见 对比度	<10(dc)	> $10^4$	> $10^4$	> $10^4$	$10^4$
优点	结构简单	响应快	暗电流小	高速响应	增益大

缺点	响应慢， 暗电流大	RC 限制， Mg 激活率 低	响应受 RC 限制	响应受 RC 限制	结构复杂
----	--------------	-----------------------	--------------	--------------	------

#### 1.4 GaN 基 PIN 结构紫外探测器的性能及存在的困难

表 1.3 PIN 结构紫外探测器<sup>[7~9]</sup>

	材料结构	合 金 组分	响应度/ $\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$	相应波长下最大 响应度/ $\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$	备注
Cree 公司	p-GaN/i-AlGaN/n-GaN	$x > 0.3$	80(@285nm)	230	光前置入射
	p-GaN/i-AlGaN/n-AlGaN		33(@275nm)	222	光背置入射
Illinois 大 学	p-AlGaN/i-GaN/n-GaN	$x = 0.12$	150(@-10V , 365nm)	294	响 应 时 间 118ns
	GaN pin	$x = 0$	70(@365nm)	294	
Californi a 大学	pin on LEO 衬底		50(@-10V, 285nm)	230	$I_{\text{Dark}} = 10\text{nA}/\text{cm}^2$
北卡州立 大学	p-GaN/i-GaN /n-AlGaN	$x = 0.23$	210(@358nm)	288	128×128 单 元像素
台湾国立 中央大学	(pin-AlGaN/GaN 超晶格)pin	$x = 0.12$	50 (@0V, 356nm)	287	$I_{\text{Dark}} = 3\text{nA}/\text{cm}^2$
Texas 大 学	AlGaN pin	$x > 0.4$	130(@0V, 274nm)	221	AlGaN 窗口



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

廈門大學博碩士論文